三相输电线动力系统耦合减振试验研究

谢献忠,吴源杰,王文军,梁开元,彭剑

(湖南科技大学土木工程学院,411201 湘潭)

摘　要:对三相输电线动力系统进行了耦合减振试验研究。选择湖南省某 220 kV 输电线路作为工程原型,设计制作了三相耦合输电线路的动力相似试验模型、刚度可调的相间间隔棒以及时延加载装置。对于三相耦合的非线性多振子动力系统,全面考虑耦合强度、时间延迟和频率错配等影响因素,通过调整模型结构参数或采用延迟激励措施,使整个系统处于一种微幅振动的最优状态,从而实现三相输电线路的耦合减振。试验结果表明,随着时延参数和耦合强度的增大,动力系统依次出现振幅下降-微幅振动-振幅上升 3 个参数区间,稳定且有一定分布跨度的微振区间为输电线路的耦合减振控制提供了便利。增大三相线路的放线应力差异化,即增大系统的频率错配参数,振幅呈整体下降态势,但当放线应力差异化接近 10% 左右时,振幅已基本稳定,频率错配的减振效果趋于最优。全面考虑耦合强度、时间延迟和频率错配等影响因素对三相输电线动力系统进行最优设计,则该系统在各种危险工况下的减振率可达 30% ~90% 。

关键词:耦合减振;频率错配;时延耦合;耦合强度;输电线路

中图分类号:O322;TM75　　**文献标志码:**A

Experimental study on vibration reduction of dynamic system of three-phase coupled transmission line

XIE Xianzhong,WU Yuanjie,WANG Wenjun,LIANG Kaiyuan,PENG Jian

(School of Civil Engineering,Hunan University of Science and Technology,411201 Xiangtan,China)

Abstract: The vibration reduction of dynamic system of three-phase coupled overhead transmission line was studied. With the 220 kV transmission line project of Hunan Province as the engineering prototype,a test model of two-span three-phase transmission line with adjustable stiffness interphase spacers and time delay excitation device was designed according to the principle of dynamic similarity. The three-phase transmission lines are a nonlinear multi-vibrator coupled dynamic system,and the state of micro-amplitude vibration can be achieved by optimizing the structural parameters of coupling strength,frequency mismatch and time delay. The test results show that the vibration of transmission line system has three stages i. e. amplitude declining,micro-amplitude vibration and amplitude rise with the increase of parameters of coupling strength and time delay. The stable parameter interval of micro-amplitude vibration is convenient for

收稿日期:2020-07-14　　**修回日期:**2021-11-17
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11272119)
通信作者:谢献忠,教授。E-mail:xianzhongx@163. com
引用格式:谢献忠,吴源杰,王文军,等. 三相输电线动力系统耦合减振试验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):87-95.
XIE Xianzhong,WU Yuanjie,WANG Wenjun,et al. Experimental study on vibration reduction of dynamic system of three-phase coupled transmission line[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):87-95.

the control of vibration of transmission line. The tension of three-phase transmission lines is adjusted asynchronously to realize frequency mismatch between vibrators. The larger the frequency mismatching parameter, the smaller the vibration amplitude of the system. When the tension differentiation between phases reaches 10%, the vibration amplitude of system tends to be stable and achieves the minimum value. Considering the factors such as coupling strength, frequency mismatch and time delay comprehensively, the vibration reduction rate of optimal system can be as high as 30%-90% under various dangerous conditions.

Key words: coupled vibration reduction; frequency mismatch; delay coupling; coupling strength; transmission line

架空输电线路跨度大、覆盖区域广，风致灾害是影响线路安全运行的主要因素之一。线路舞动是一种具有强非线性的流固耦合振动，同时还伴随着相间以及档间的耦合作用，极易引发线路相间闪络、跳闸、线路断线、倒塔等电力事故[1]。

避舞、抗舞和抑舞是三种主要的线路防舞措施，避舞指结合地形和局部气象条件，选用线路的合适走向来避免发生舞动；抗舞是指通过增强线路的抵抗能力来保障输电线路的运行安全；抑舞则是在发生大幅舞动的线路上安装防舞设备，控制舞动的幅度[2]。针对架空输电线路的舞动控制问题，国内外学者基于不同的舞动机理研制出了不同的防舞装置，主要包括扰流防舞器[3]、失谐摆[4-5]、间隔棒[6-8]、阻尼器[9]等传统的防舞技术及其改进装置。

文献[10]理论分析了导线舞动中的混沌运动，作出内共振的 Arnold 舌头曲线来判定混沌区域，建立了系统同时存在 3 种内共振形式的混沌运动机理。文献[11]在风洞中采用三自由度频率可调的弹簧悬挂装置，考察了 D 形覆冰六分裂导线的舞动响应特性，并与三自由度非线性舞动响应计算结果进行对比验证，分别基于实测和计算结果判定了实际输电线路的起舞风速。文献[12]建立了相间间隔棒三角形排布线路的有限元模型，根据不同档距下线路的舞动特征，同时考虑垂直与水平方向的振动模式，设计了不同档距情况下相间间隔棒的布设方案，减振效果明显。文献[13]基于相似原理建立了覆冰输电导线完全气弹性模型，研究了相间间隔棒在不同风速下的布置方案对减振效果的影响。结果表明，间隔棒在多个等分点处螺旋排列时减振效果最佳。文献[14]研究表明，加装防舞装置的导线在一定条件下仍有可能发生 Nigol 舞动，需合理设计和布置防舞装置，提出了次档距和双摆防舞器布置方案。文献[15]提出声子晶体导线的概念，利用局域共振声子晶体的带隙特征，消除导线在该频段范围内的大幅舞动。

目前根据舞动机理开发的防舞装置通常只适用于某一特定的激励环境，减振效果十分有限。本文在已有的研究基础上，结合架空输电线动力系统的特性，提出了三相耦合减振的舞动控制方法。该方法将分裂导线间隔棒视为一个质点或刚体（包括连接线路的等效质量），当间隔棒发生位移时，分裂导线产生非线性弹性恢复力，因此，单个间隔棒与所连接的输电线可以简化为一个非线性弹簧振子，每相输电线上有多个间隔棒振子，三相输电线通过相间间隔棒连接构成了一个大的非线性多振子耦合动力系统。综合考虑相间耦合强度、频率错配和时间延迟等因素对系统进行参数优化，使得振子间相互约束、相互抑制，使系统达到微幅振动的状态，从而实现对输电线舞动的控制。

1 试验模型及其动力响应特性

1.1 工程原型

选择湖南省某 220 kV 输电线路作为工程原型，选取其中一段耐-直-耐两档结构形式作为研究对象，其档距分别为 352 m 和 248 m，两端为干字型耐张塔，中间为酒杯型直线塔。导线采用 LGJ-400/30 型钢芯铝绞线，悬垂绝缘子串型号为 TZ-2，耐张绝缘子串型号为 SDN-323，相间间隔棒型号为 FXGB-110。

1.2 试验模型及延迟激励系统

根据动力相似准则设计塔线体系试验模型（见图 1），输电导线采用钢丝模拟，钢丝弹性模量 $E_m = 209$ GPa，原型导线综合弹性模量 $E_p = 69$ GPa，则弹性模量相似比为

$$C_E = E_m / E_p = 3.03 \tag{1}$$

考虑原型尺寸大小和实验室场地条件的限制，几何相似比取为

$$C_l = 1/20 \tag{2}$$

在几何相似比 C_l 和弹性模量相似比 C_E 已经确定的前提下,其他物理参数的相似比和参数值可根据动力相似准则计算得出,具体数值见表 1。

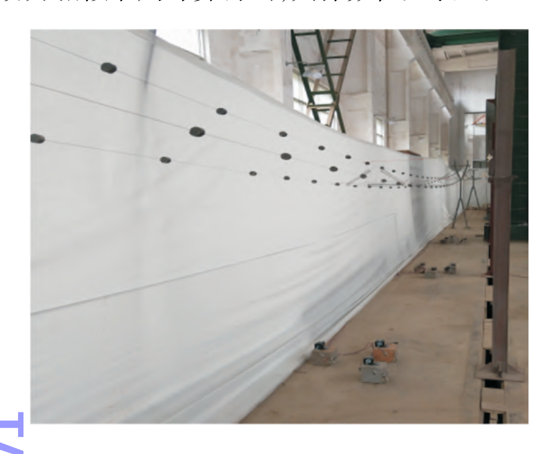


图 1 塔线体系试验模型

Fig. 1 Tower-line system test model

表 1 模型物理参数相似比及其参数值

Tab. 1 Model physical parameter similarity ratio and its parameter value

物理量	相似关系	相似比	参数值
导线外径/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	1.38×10^{-3}
导线弹性模量/MPa	$C_E = E_m/E_p$	3.03	2.09×10^{5}
导线线密度/(kg·m^{-1})	$C_\rho = C_E/C_l$	3.03/20	0.229
导线放线应力/MPa	$C_\sigma = C_E/C_\varepsilon$	3.03	181.8
第一档档距/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	17.6
第二档档距/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	12.4
时间	$C_t = C_l^{1/2}$	1/4.472	
频率	$C_f = C_l^{-1/2}$	4.472	
速度	$C_V = C_l^{1/2}$	1/4.472	

在满足动力相似准则的前提下,输电导线模型的线密度高达 229 g/m,而实验采用的钢丝的线密度仅为 8.8 g/m,需配重 220.2 g/m。相对于输电线而言,输电塔的刚度大很多,其对输电线舞动的影响较小。因此,在考虑整体动力特性相似的前提下,输电塔模型采用简化的等代塔来模拟,即模型等代塔与原型塔前两阶振型相同,频率相似。刚性耦合在防舞、抑舞中是否为最佳的减振方式,还有待进一步的研究。针对这一问题,设计了图 2 所示的变刚度相间间隔棒。通过调整相间间隔棒弹力线的刚度或在线路中的拓扑结构,可以改变相与相之间各振子的耦合强度。各相输电线路所处的空间位置不同,风荷载等环境激励作用存在明显的延迟效应。因此,本试验设计、制作了一套高精度的时延加载系统,该系统包括微型一体化步进电机、转换器、偏心装置、限位器和驱动软件等主要装置和部件,如图 3 所示。9 套时延加载系统分成 3 组,分别在档距的 3 个不同位置激励三相输电线路,通过控制每个电机的启动时间实现延迟激励。



图 2 变刚度相间间隔棒

Fig. 2 Variable stiffness interphase spacer

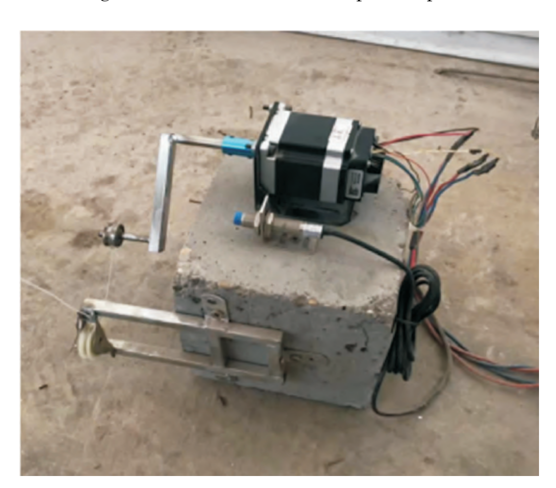


图 3 时延加载装置

Fig. 3 Time delay loading device

1.3 线形与模态验证

为了保证塔线体系试验模型在自重和配重作用下线形的正确性,采用激光测距仪测量了三相两档共 18 个测点的弧垂,并与设计弧垂进行了对比分析,最大误差不超过 2.5%(见表 2)。

为了验证试验模型模态的正确性,采用 synergy 系统测量第一档输电线自由振动的加速度信号,并进行频谱分析。测试结果表明,测试频率与设计频率吻合,最大误差不超过 2.4%(见表 3)。

表 2　测试弧垂与设计弧垂对比

Tab. 2　Comparison of test sag and design sag

相路	测点位置	测试弧垂/m	设计弧垂/m	弧垂误差/%
第 1 相线路	第 1 跨 1/4 点	0.321	0.324	0.9
	第 1 跨 1/2 点	0.430	0.432	0.5
	第 1 跨 3/4 点	0.322	0.324	0.9
	第 2 跨 1/4 点	0.154	0.158	2.5
	第 2 跨 1/2 点	0.210	0.214	1.9
	第 2 跨 3/4 点	0.155	0.158	1.9
第 2 相线路	第 1 跨 1/4 点	0.320	0.324	1.3
	第 1 跨 1/2 点	0.428	0.432	0.9
	第 1 跨 3/4 点	0.321	0.324	0.9
	第 2 跨 1/4 点	0.155	0.158	2.5
	第 2 跨 1/2 点	0.211	0.214	1.9
	第 2 跨 3/4 点	0.156	0.158	1.9
第 3 相线路	第 1 跨 1/4 点	0.321	0.324	0.9
	第 1 跨 1/2 点	0.429	0.432	0.7
	第 1 跨 3/4 点	0.322	0.324	0.6
	第 2 跨 1/4 点	0.154	0.158	2.5
	第 2 跨 1/2 点	0.210	0.214	1.9
	第 2 跨 3/4 点	0.155	0.158	1.9

1.4　动力响应特性

以第 1 档线路为测试对象,不考虑相间耦合,采用非接触式视频测量仪测试三相线路在各种不同频率简谐激励作用下的动力响应,根据响应的最大振幅确定危险的激励工况。简谐激励分别作用在第 1 档各相线路的四分点处,位移测点分别位于各相线路的跨中和 $L/4$ 点(见图 4)。响应测试结果如图 5、图 6 所示,横坐标表示激励频率,纵坐标表示竖向、横向矢量合成的最大振幅。两图中均出现 4 个明显的峰值区,对应 4 个危险的激励频率区间,其频率范围分别在 0.85 Hz ~ 0.98 Hz、1.14 Hz ~ 1.24 Hz、1.78 Hz ~ 1.98 Hz 和 2.68 Hz ~ 2.86 Hz 之间。当振动处于响应峰值附近时,导线已进入非线性振动状态,大幅振动导致导线张力增加,因而系统频率会有所提高。表 3 所示线性微幅振动状态下的前 6 阶固有频率都靠近响应峰值频率区间的下限。在非峰值区,振幅都非常小,说明输电线均处于微幅振动的状态。

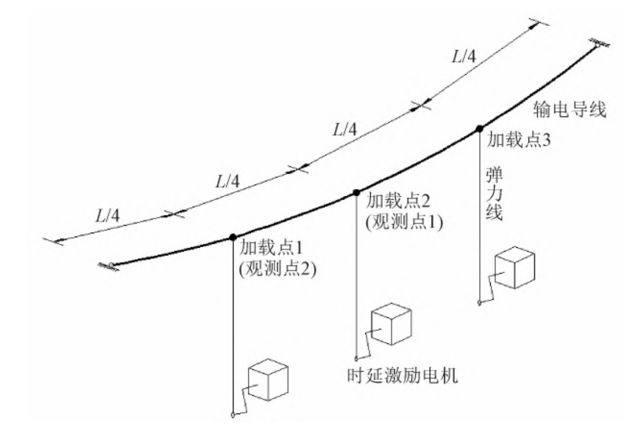


图 4　加载点和观测点示意图

Fig. 4　Loading point and observation point

表 3　测试频率与设计频率对比(第 1 档输电线)

Tab. 3　Comparison of test frequency and design frequency (the 1st gear transmission line)

阶数	相路	振型描述	实测频率/Hz	设计频率/Hz	误差/%
1 阶振型	第 1 相	横向振动	0.811	0.806	0.6
	第 2 相	横向振动	0.813	0.806	0.9
	第 3 相	横向振动	0.810	0.806	0.5
2 阶振型	第 1 相	竖向振动	1.065	1.060	0.5
	第 2 相	竖向振动	1.064	1.060	0.4
	第 3 相	竖向振动	1.065	1.060	0.5
3 阶振型	第 1 相	横向振动	1.666	1.635	1.9
	第 2 相	横向振动	1.671	1.635	2.2
	第 3 相	横向振动	1.672	1.635	2.2
4 阶振型	第 1 相	竖向振动	1.740	1.715	1.9
	第 2 相	竖向振动	1.749	1.715	2.0
	第 3 相	竖向振动	1.720	1.715	0.3
5 阶振型	第 1 相	横向振动	2.506	2.528	0.9
	第 2 相	横向振动	2.539	2.528	0.4
	第 3 相	横向振动	2.497	2.528	1.2
6 阶振型	第 1 相	竖向振动	2.573	2.635	2.4
	第 2 相	竖向振动	2.572	2.635	2.3
	第 3 相	竖向振动	2.587	2.635	1.8

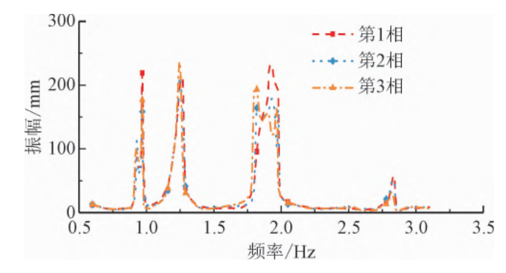


图 5　跨中振幅随激励频率变化曲线

Fig. 5　The curve of mid-span amplitude with excitation frequency

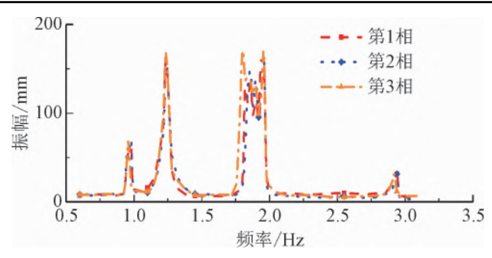


图 6　$L/4$ 点振幅随激励频率变化曲线

Fig. 6　The curve of $L/4$ point amplitude with excitation frequency

2　耦合减振试验研究

考虑相间耦合，则三相输电线系统构成了一个复杂的非线性多振子耦合动力系统，该类系统一般存在微幅振动现象，而且振子间的频率错配、耦合强度和时延耦合是实现系统微幅振动的 3 个关键因素。本文结合工程实际和试验条件，通过调整相间间隔棒的刚度改变振子间的耦合强度；通过调整输电线路放线张力实现振子间的频率错配；通过采用时延激励系统实现振子间的时延耦合。下面将从上述 3 个不同侧面探讨三相耦合输电线动力系统的微幅振动现象。

2.1　耦合强度参数研究

本文采用三角形拓扑构型布置相间间隔棒，并沿线路均匀安装，安装点位于档距的 3 个四分点处（见图 1 ~ 图 2）。振子间耦合强度的改变可以通过调整相间间隔棒刚度参数来实现，相间间隔棒刚度参数的取值范围为 80 N/m ~ ∞（完全刚性），耦合强度试验工况如表 4 所示。耦合强度试验工况分为 7 类，每 1 类中由于激励频率的依次递增又包含数十组，每 1 组加载工况都需测试 6 个点的位移时程数据，因此总的数据量非常庞大。为了节省篇幅而又不失一般性，本文只给出第 1 相线路跨中测点的相关数据和分析。

图 7 对强度耦合前后第 1 相线路的振幅进行了对比，在所有的激励频率工况下，相间耦合对第 1 相线路的振幅都有不同程度的抑制作用，尤其是当相间间隔棒刚度在 100 N/m ~ 460 N/m 范围内时，效果非常明显。这一点从图 8 可以看得更清晰，图 8 是在图 7(b) 的基础上沿横坐标（激励频率 0.9 Hz、1.2 Hz、1.8 Hz、1.9 Hz、2.7 Hz、2.8 Hz）的 6 条剖面曲线，分别对应 6 个危险的激励工况。从图 8 可以看出，当耦合强度很小时，第 1 相线路的振幅随耦合强度的增加而逐渐减小；当耦合强度达到 100 N/m 时，绝大多数危险工况下线路进入为微幅振动的状态，随着耦合强度在一定区间内继续增大，该微幅振动状态保持相对稳定；当耦合强度超过 460 N/m 时，某些危险工况下线路的振幅又呈整体上升的趋势。图 9 对某危险工况下强度耦合前后第一相线路跨中的位移时程曲线进行了对比，该工况中激励频率为 0.9 Hz，相间间隔棒刚度为 160 N/m。从图 9 可以看出，由于激励频率介于横向和竖向 1 阶固有频率之间，其在未耦合线路中激起以横向振动为主的双向大幅的新月形舞动。当相与相之间耦合后，线路舞动的幅值大为降低，主要表现为横向小幅振动。表 5 对耦合前后第 1 相线路的振幅进行了具体的数值比较和分析，当耦合强度为 160 N/m 时，6 个危险激励工况下的减振率分别高达 37.5% ~ 83.9%，线路基本处于微幅振动的状态。

表 4　耦合强度试验工况表

Tab. 4　Coupling strength test conditions

工况类型	激励频率（最小间隔 0.02 Hz）/Hz	相间隔棒刚度/($N \cdot m^{-1}$)	数据采集点
1	0.5 ~ 3.1	80	$L/4$、$L/2$
2	0.5 ~ 3.1	160	$L/4$、$L/2$
3	0.5 ~ 3.1	240	$L/4$、$L/2$
4	0.5 ~ 3.1	320	$L/4$、$L/2$
5	0.5 ~ 3.1	400	$L/4$、$L/2$
6	0.5 ~ 3.1	480	$L/4$、$L/2$
7	0.5 ~ 3.1	完全刚性	$L/4$、$L/2$

表 5　强度耦合前后第 1 相线路的振幅对比

Tab. 5　The contrast of the first phase's amplitude with and without coupling strength

振幅及减振率	激励频率/Hz					
	0.9	1.2	1.8	1.9	2.7	2.8
无相间耦合振幅/mm	217	207	178	231	62	56
160 N/m 强度耦合振幅/mm	35	76	64	101	22	35
减振率/%	83.9	63.3	64.0	56.3	64.5	37.5

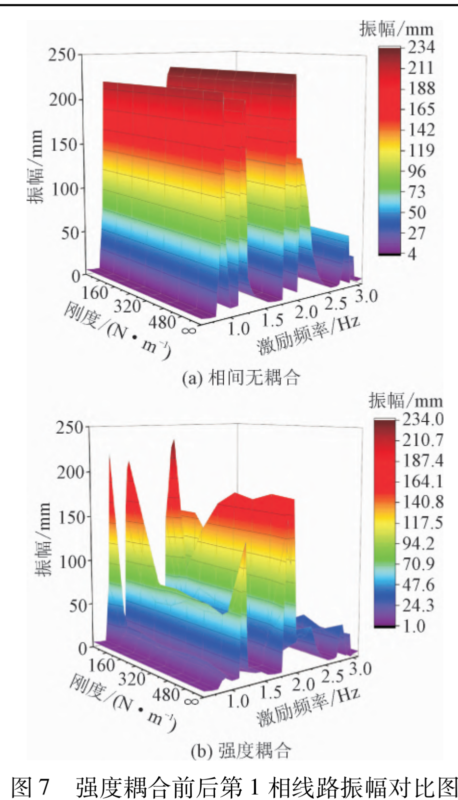


图 7　强度耦合前后第 1 相线路振幅对比图

Fig. 7　The comparison of the first phase's amplitude with and without coupling strength

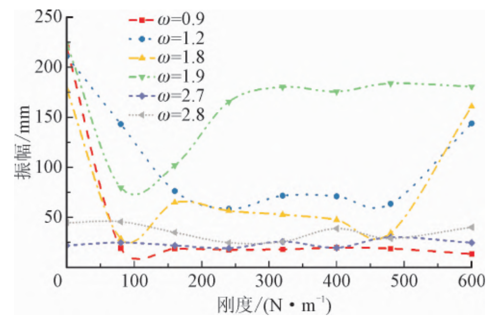


图 8　第 1 相线路振幅随耦合强度的变化曲线

Fig. 8　The variation curve of the first phase's amplitude with the coupling strength

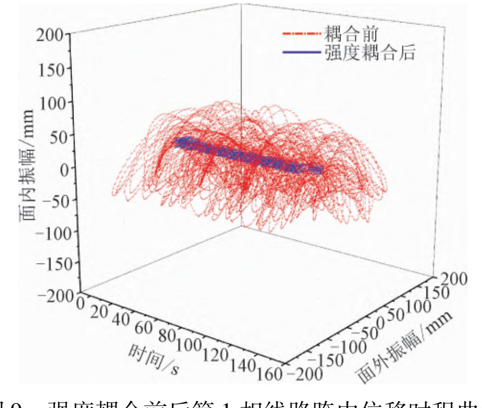


图 9　强度耦合前后第 1 相线路跨中位移时程曲线

Fig. 9　Mid-span displacement time history curve of the first phase with and without coupling strength

2.2　时延耦合参数研究

各时延耦合试验工况如表 6 所示，所有工况中的相间耦合强度（刚度）均取为 200 N/m。同理，为了节省篇幅而又不失一般性，本文只给出第 1 相线路跨中测点的相关数据和分析。

图 10 对时延耦合前后第 1 相线路的振幅进行了对比，在所有的激励频率工况下，相间时延耦合对第 1 相线路的振幅都有不同程度的抑制作用，尤其在 150 ms ~ 350 ms 时延范围内，效果非常明显。这一点从图 11 可以看得更清晰，图 11 是在图 10（b）的基础上沿横坐标的 6 条剖面曲线，分别对应 6 个危险的激励工况。从图 11 可以看出，当时延很小时，第一相线路的振幅随时延的增加而逐渐减小；当时延达到 150 ms 时，线路进入为微幅振动的状态，随着时延在一定区间内继续增大，该微幅振动状态保持相对稳定；当时延超过 350 ms 时，线路的振幅又呈整体上升的趋势。图 12 对某危险工况下时延耦合前后第 1 相线路跨中位移时程曲线进行了对比，该工况中激励频率为 1.2 Hz，时延参数为 185 ms。从图 12 可以看出，由于激励频率更接近导线竖向振动固有频率，其在未耦合线路中激起竖向大幅舞动。当相与相之间时延耦合后，线路舞动的幅值大为降低，主要表现为横向振动为主的双向椭圆振动。表 7 对时延耦合前后第 1 相线路的振幅进行了具体的数值比较和分析，当耦合时延为 185 ms 时，6 个危险激励工况下的减振率高达 64.3% ~ 81.6%，线路基本处于微幅振动的状态。

表 6　时延耦合试验工况

Tab. 6　Time delay coupling test conditions

工况类型	加载频率（最小间隔 0.02 Hz）/Hz	相间时延/ms	数据采集点
1	0.5 ~ 3.1	50	$L/4$、$L/2$
2	0.5 ~ 3.1	95	$L/4$、$L/2$
3	0.5 ~ 3.1	140	$L/4$、$L/2$
4	0.5 ~ 3.1	185	$L/4$、$L/2$
5	0.5 ~ 3.1	230	$L/4$、$L/2$
6	0.5 ~ 3.1	275	$L/4$、$L/2$
7	0.5 ~ 3.1	320	$L/4$、$L/2$
8	0.5 ~ 3.1	365	$L/4$、$L/2$
9	0.5 ~ 3.1	410	$L/4$、$L/2$
10	0.5 ~ 3.1	455	$L/4$、$L/2$
11	0.5 ~ 3.1	500	$L/4$、$L/2$
12	0.5 ~ 3.1	560	$L/4$、$L/2$

表 7　时延耦合前后第 1 相线路的振幅对比

Tab. 7　The contrast of the first phase's amplitude with and without time delay coupling

振幅及减振率	激励频率/Hz					
	0.9	1.2	1.8	1.9	2.7	2.8
无相间耦合振幅/mm	217	207	178	231	62	56
185 ms 时延耦合振幅/mm	40	38	46	58	21	20
减振率/%	81.6	81.6	74.2	74.9	66.1	64.3

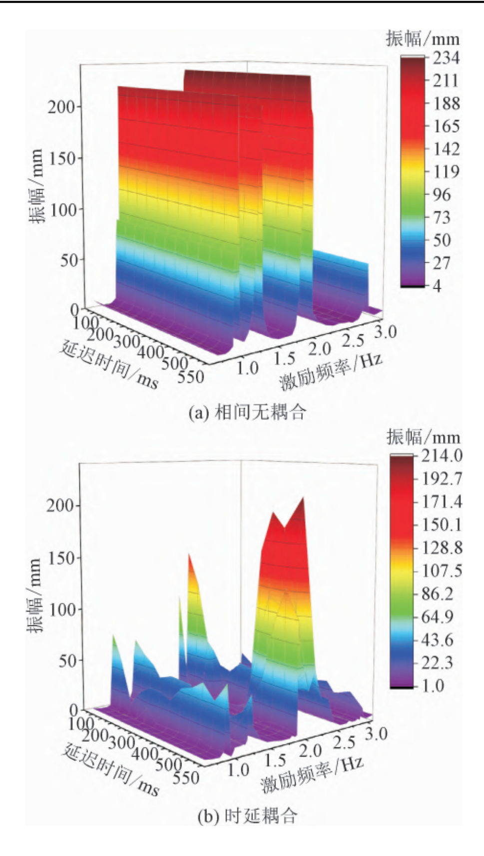


图 10　时延耦合前后第 1 相线路振幅对比图

Fig. 10　The comparison of the first phase's amplitude with and without time delay coupling

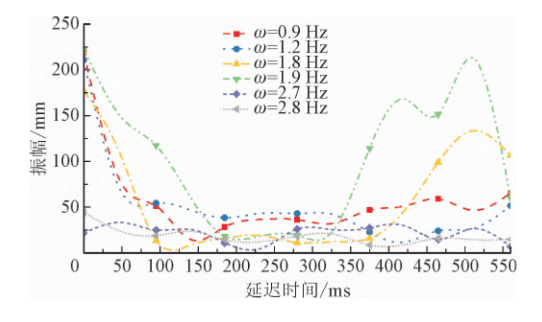


图 11　第 1 相线路振幅随延迟时间的变化曲线

Fig. 11　The variation curve of the first phase's amplitude with the time delay

2.3　频率错配参数研究

实现振子间频率错配的方法有多种，本文采用简单有效而又便于工程应用的张力差异法，保持第 1 相线路张力不变，其余两相线路的张力同时下调 2% ~12%。张力下调可以降低线路的横向刚度，从而降低线路上各振子的固有频率，实现频率错配。频率错配试验工况如表 8 所示，所有工况中的相间耦合强度(刚度)均取为 200 N/m。同理，为了节省篇幅而又不失一般性，本文只给出第 1 相线路跨中测点的相关数据和分析。

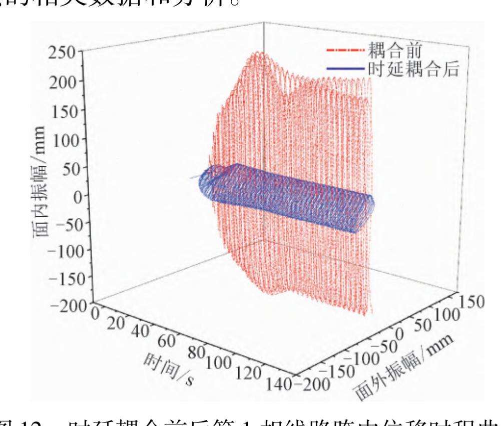


图 12　时延耦合前后第 1 相线路跨中位移时程曲线

Fig. 12　Mid-span displacement time history curve of the first phase with and without time delay coupling

表 8　频率错配加载工况

Tab. 8　Frequency mismatch test conditions

工况类型	加载频率(最小间隔 0.02 Hz)/Hz	张力差比/%	数据采集点
1	0.5 ~3.1	2	$L/4$、$L/2$
2	0.5 ~3.1	4	$L/4$、$L/2$
3	0.5 ~3.1	6	$L/4$、$L/2$
4	0.5 ~3.1	8	$L/4$、$L/2$
5	0.5 ~3.1	10	$L/4$、$L/2$
6	0.5 ~3.1	12	$L/4$、$L/2$

图 13 对频率错配耦合前后第 1 相线路的振幅进行了对比，在所有的激励频率工况下，频率错配耦合对第 1 相线路的振幅都有不同程度的抑制作用，而且随着线路间张力差比(频率错配)的增大，抑制

振动的效果更明显。这一点从图 14 可以看得更清晰,图 14 是在图 13(b)的基础上沿横坐标的 6 条剖面曲线,分别对应 6 个危险的激励频率工况。从图 14可以看出,随着相间放线张力差异化的增大,即增大频率错配参数,第 1 相线路的振幅呈整体下降趋势,但当放线张力差异化达到 10% 时,振幅基本趋于稳定,此时频率错配产生的减振效果已接近最优。图 15 对某危险工况下频率错配耦合前后第 1 相线路跨中的位移时程曲线进行了对比,该工况中激励频率为 1.8 Hz,放线张力差比为 12% 。从图 15 可以看出,由于激励频率更接近导线竖向振动固有频率,其在未耦合线路中激起竖向大幅舞动。当相与相之间频率错配耦合后,线路舞动的幅值大为降低,主要表现为斜向的小幅振动。表 9 对频率错配耦合前后第 1 相线路的振幅进行了具体的数值比较和分析,当相间放线张力的差异化达到 12% 时,6 个危险激励工况下的减振率分别高达 43.0% ~ 89.9% ,线路基本处于微幅振动的状态。

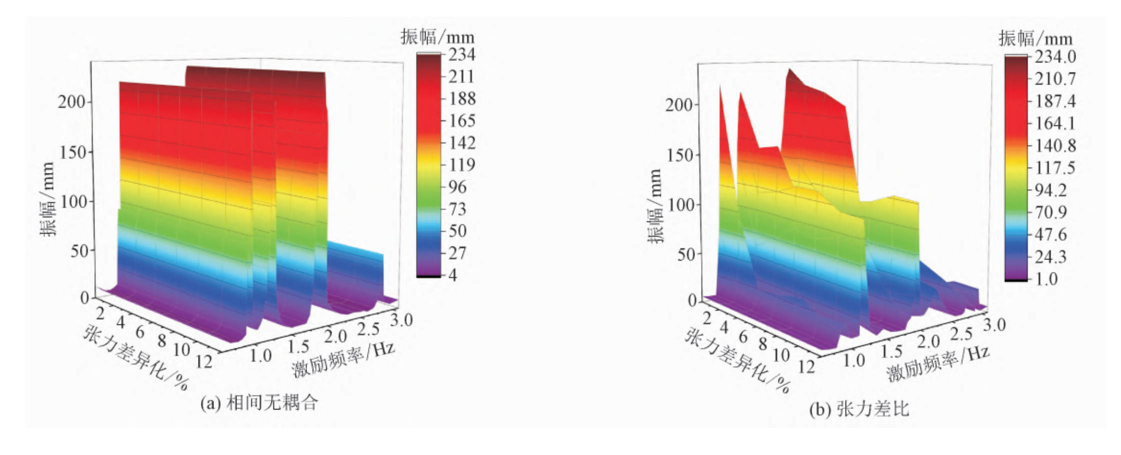


图 13 张力差比耦合前后第 1 相线路振幅对比图

Fig. 13 The comparison of the first phase's amplitude with and without tension difference ratio coupling

表 9 张力差比耦合前后第 1 相线路的振幅对比

Tab. 9 The contrast of the first phase's amplitude with and without tension difference ratio coupling

振幅及减振率	激励频率/Hz					
	0.9	1.2	1.8	1.9	2.7	2.8
无相间耦合振幅/mm	217	207	178	231	62	56
12% 张力差比耦合振幅/mm	30	118	18	119	19	15
减振率/%	86.2	43.0	89.9	48.5	69.4	73.2

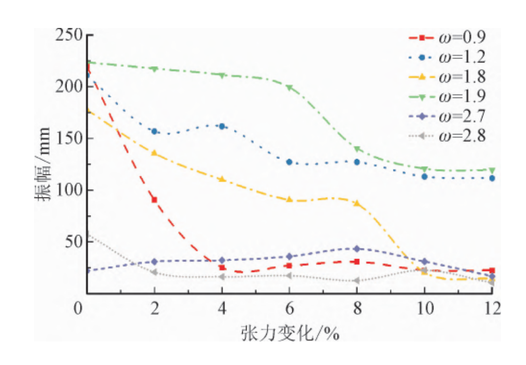


图 14 第 1 相线路振幅随张力差比的变化曲线

Fig. 14 The variation curve of the first phase's amplitude with the tension difference ratio

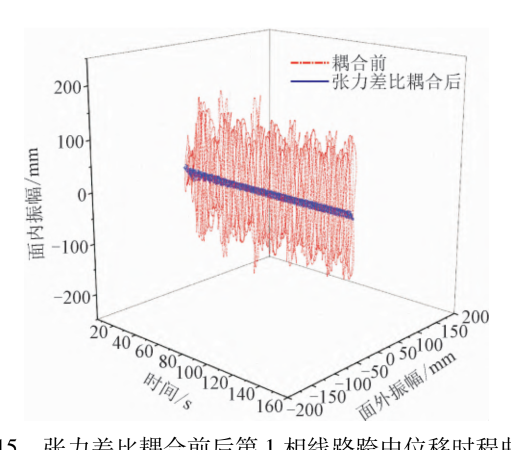


图 15 张力差比耦合前后第 1 相线路跨中位移时程曲线

Fig. 15 Mid-span displacement time history curve of the first phase with and without tension difference ratio coupling

3 结　论

本文结合架空输电线动力系统的特点，提出了三相耦合减振的舞动控制方法，并进行了初步的模型试验研究，根据试验结果与分析，可得出如下主要结论。

1）三相耦合多分裂导线系统是一个复杂的非线性多振子耦合动力学系统，存在明显的微幅振动现象。

2）随着相间间隔棒刚度参数（耦合强度）的增大，系统先后出现振幅下降-微幅振动-振幅上升3个区间，相对稳定且有一定跨度的微幅振动参数区间为输电线的减振控制提供了方便。相对于刚性耦合和不耦合而言，三相线路间的柔性耦合更具优势。

3）随着激励时延参数的增大，系统先后出现振幅下降-微幅振动-振幅上升3个区间。因此，可以通过控制时延参数来实现系统的微幅振动。

4）随着放线张力差异化的增大，即增大频率错配参数，系统振幅呈整体下降趋势，但当放线张力的差异化达到10%时，振幅基本趋于稳定，此时频率错配产生的减振效果已接近最优。

5）全面考虑耦合强度、时间延迟以及频率错配等影响因素对三相输电线系统进行最优设计，则该系统在各种危险工况下的减振率可达30%～90%。

参考文献

[1] 郭应龙，李国兴，尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京：中国电力出版社，1993.

[2] 朱宽军，尤传永，赵渊如. 输电线路舞动的研究与治理[J]. 电力建设，2004，25(12)：18-21.（ZHU Kuanjun，YOU Chuanyong，ZHAO Yuanru. Study and control on galloping of transmission lines[J]. Electric power construction，2004，25(12)：18-21(in Chinese)）.

[3] 郭菁，詹平. 基于遗传算法的扰流防舞机理研究[J]. 振动、测试与诊断，2003(3)：48-50.（GUO Jing，ZHAN Ping. A study on anti-galloping mechanism of air flow spoiler using genetic algorithm[J]. Journal of vibration measurement & diagnosis，2003(3)：48-50(in Chinese)）.

[4] HAVARD D G，POHLMAN J C. Five years' field trials of detuning pendulums for galloping control[J]. IEEE power engineering review，1984，4(2)：318-327.

[5] 汪峰，黄欲成，王丰，等. 大跨越输电线路防振锤和Bate阻尼线联合防振试验研究[J]. 应用力学学报，2020，37(5)：1957-1964.（WANG Feng，HUANG Yucheng，WANG Feng，et al. Experiments on joint anti vibration characteristics of vibration damper and beta damping line for large crossing transmission lines[J]. Chinese journal of applied mechanics，2020，37(5)：1957-1964(in Chinese)）.

[6] 徐倩，蔡萌琦，杨晓辉，等. 特高压八分裂输电线路次档距振动与防振研究[J]. 应用力学学报，2019，36(1)：196-202.（XU Qian，CAI Mengqi，YANG Xiaohui，et al. The analysis on sub-span oscillation and anti-oscillation of eight bundle conductors in UHV transmission lines[J]. Chinese journal of applied mechanics，2019，36(1)：196-202(in Chinese)）.

[7] PON C J，HAVARD D G，EDWARDS A T. Performance of inter-phase spacers for galloping control[R]. Ontario：Hydro Research Division Report，1982.

[8] 王黎明，薛家麒，范钦珊. 220kV紧凑型输电线路相间合成绝缘间隔棒的研究[J]. 高电压技术，1995(1)：3-7.（WANG Liming，XUE Jiaqi，FAN Qinshan，et al. The 220kV phase to composite spacer for the compact transmission[J]. High voltage engineering，1995(1)：3-7(in Chinese)）.

[9] HUNT J C R，RICHARDS D J W. Overhead line oscillations and the effect of aerodynamic dampers[J]. Proceedings of the institution of electrical engineers，1969，116：1869-1874.

[10] 侯磊，陈予恕. 输电线路导线舞动中的混沌运动研究[J]. 振动工程学报，2014，27(1)：75-83.（HOU Lei，CHEN Yushu. Study on chaos in galloping of the transmission line[J]. Journal of vibration engineering，2014，27(1)：75-83(in Chinese)）.

[11] 楼文娟，余江，姜雄，等. 覆冰六分裂导线舞动风洞试验及起舞风速研究[J]. 振动工程学报，2017，30(2)：280-289.（LOU Wenjuan，YU Jiang，JIANG Xiong，et al. Wind tunnel test and critical wind speed study for galloping of 6-bundled conductors[J]. Journal of vibration engineering，2017，30(2)：280-289(in Chinese)）.

[12] 严波，崔伟，何小宝，等. 三相导线三角形排布线路相间间隔棒防舞研究[J]. 振动与冲击，2016，35(1)：106-111.（YAN Bo，CUI Wei，HE Xiaobao，et al. Anti-galloping design of interphase spacers in three-phase conductor lines with triangle arrangement[J]. Journal of vibration and shock，2016，35(1)：106-111(in Chinese)）.

[13] ZHOU Anqi，LIU Xijun. Wind tunnel test of the influence of an interphase spacer on the galloping control of iced eight-bundled conductors[J]. Cold regions science and technology，2018，155：354-366.

[14] 赵彬，程永峰，王景朝，等. 2015年初湖北架空线路覆冰舞动灾害原因的理论分析与应对措施[J]. 振动与冲击，2017，36(10)：93-97.（ZHAO Bin，CHENG Yongfeng，WANG Jingchao，et al. Theoretical analysis and countermeasures on the galloping of iced overhead transmission lines in Hubei in early 2015[J]. Journal of vibration and shock，2017，36(10)：93-97(in Chinese)）.

[15] 张子明，柯一丹，韩林，等. 声子晶体导线的振动带隙特性[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2017，45(3)：224-229.（ZHANG Ziming，KE Yidan，HAN Lin，et al. Vibration band gap characteristics of phononic crystal conductor[J]. Journal of Hohai University (natural sciences)，2017，45(3)：224-229(in Chinese)）.

（编辑　李坤璐）